

Stand der Entwicklung von H₂-Brennstoffzellen- & Verbrennungsmotor-Antriebssträngen für Fahrzeuge

Dipl.-Ing. Andreas Brinner



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Deutsches Zentrum für Luft- & Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR-FK)
Pfaffenwaldring 38-40, D-70569 Stuttgart
Tel: 0711 6862 574 / Fax: 0711 6862 1574
E-mail: andreas.brinner@dlr.de / Internet: www.dlr.de/fk



Vortragsinhalt

- Kurzvorstellung des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte
- Motivation der Entwicklung neuer Antriebsstränge
- Brennstoffzellen-Technologien und Funktionsprinzipien
- Architektur von Brennstoffzellen-Antriebssträngen im Fahrzeug
- Verfahrenstechnisches Konzept eines PEFC-Systems
- Verfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen
- PEFC-Systempackage im Fahrzeug
- Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und Antriebsstrang
- Wasserstoffspeicher-Technologien für Fahrzeug



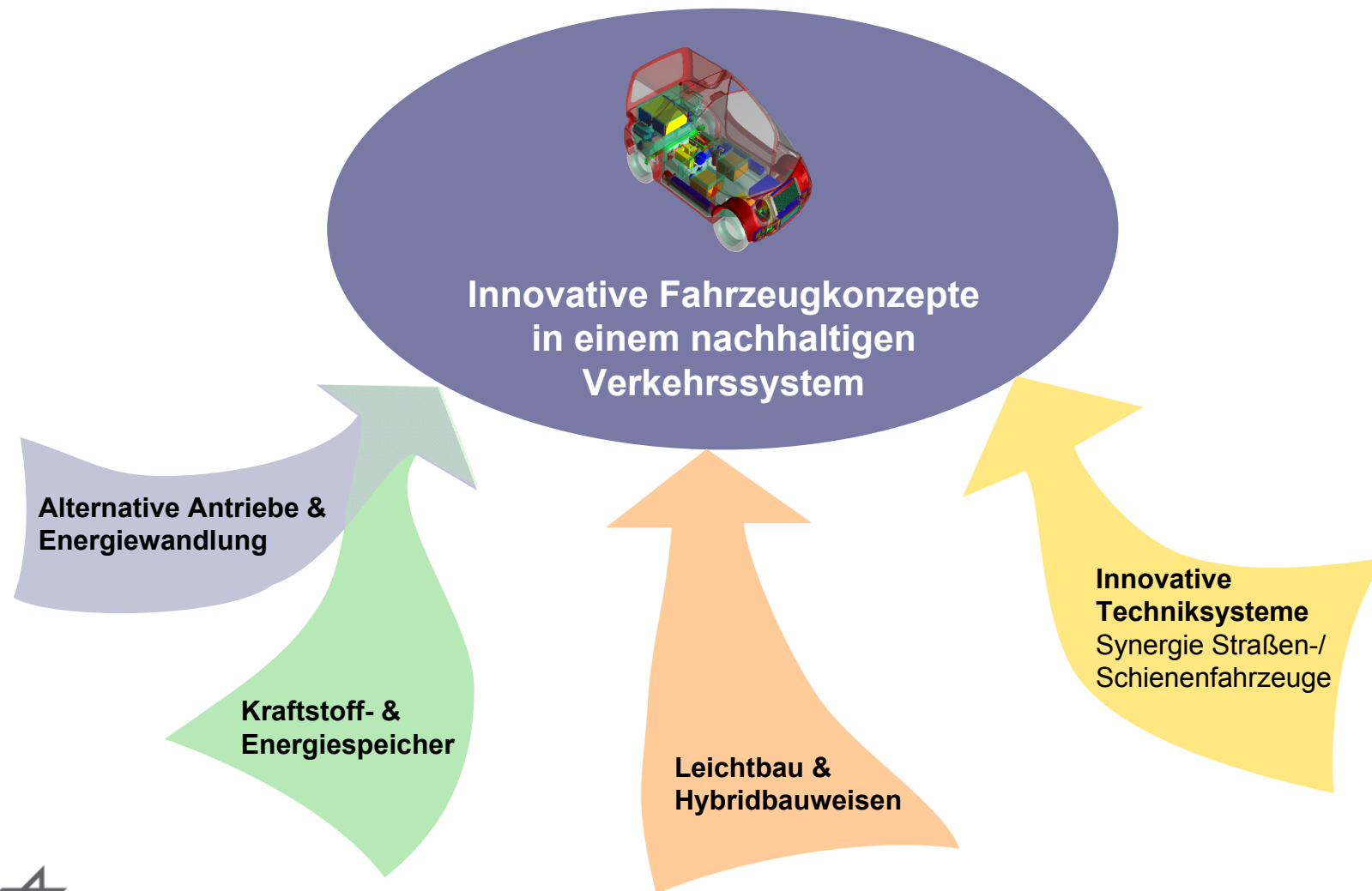
Vortragsinhalt

- **Kurzvorstellung des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte**
- Motivation der Entwicklung neuer Antriebsstränge
- Brennstoffzellen-Technologien und Funktionsprinzipien
- Architektur von Brennstoffzellen-Antriebssträngen im Fahrzeug
- Verfahrenstechnisches Konzept eines PEFC-Systems
- Verfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen
- PEFC-Systempackage im Fahrzeug
- Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und Antriebsstrang
- Wasserstoffspeicher-Technologien für Fahrzeuge



Das Institut für Fahrzeugkonzepte

Professor Horst E. Friedrich



Vision

Nachhaltige, sichere und finanzierbare
„Individuelle Mobilität“



- Signifikant verbesserte Nutzung der Energiepotenziale für Fahrzeug- / und Transportsysteme
- Durchbruch bei emissions- / CO₂-freien oder neutralen Antriebstechnologien
Beispiel: Fahrzeugtaugliche Brennstoffzellensysteme
- Erweiterung der Energieträger im Verkehr
Leistungsfähige Wasserstoffspeicher





Vortragsinhalt

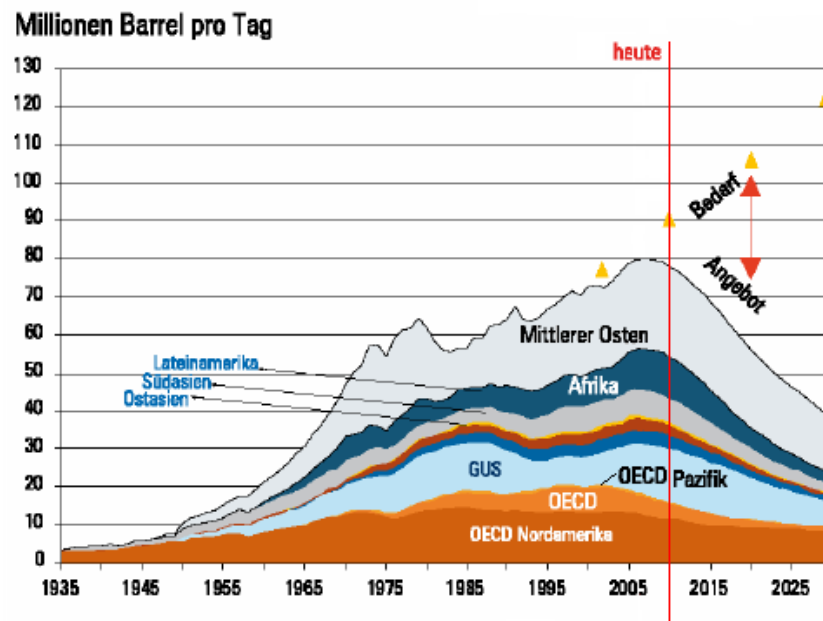
- Kurzvorstellung des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte
- **Motivation der Entwicklung neuer Antriebsstränge**
- Brennstoffzellen-Technologien und Funktionsprinzipien
- Architektur von Brennstoffzellen-Antriebssträngen im Fahrzeug
- Verfahrenstechnisches Konzept eines PEFC-Systems
- Verfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen
- PEFC-Systempackage im Fahrzeug
- Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und Antriebsstrang
- Wasserstoffspeicher-Technologien für Fahrzeuge



Motivation für neue Fahrzeugkonzepte und Antriebe

Unser auf fossile Energieträger gestütztes Energiesystem ist **nicht zukunftsfähig**. Die beiden wichtigsten Gründe:

Erschöpfung der Ressourcen

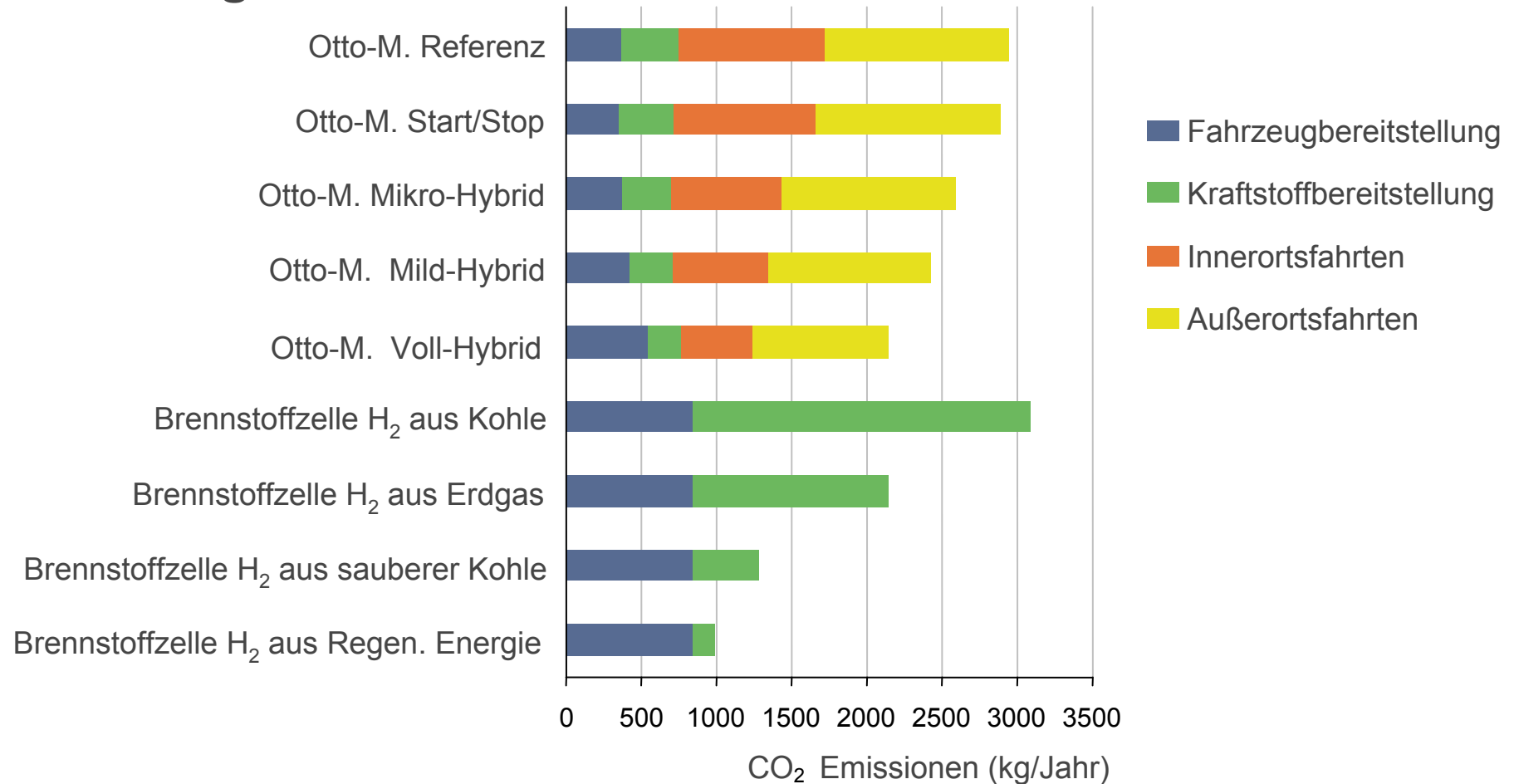


Klimaschutz





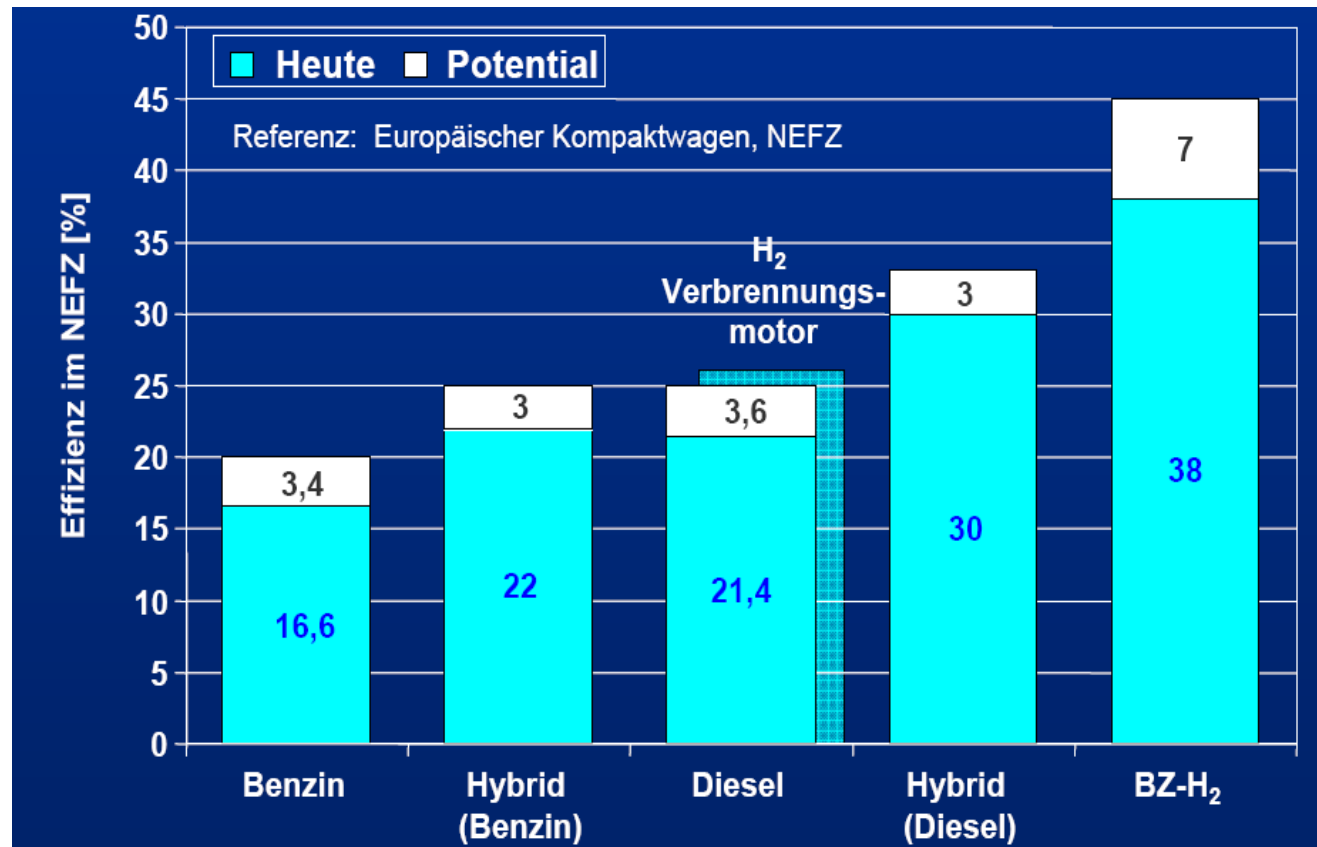
CO₂ – Emissionen von Hybridantriebskonzepten im Vergleich zur Brennstoffzelle



Quellen: DLR. R. Edwards, Well-To-Wheel Analysis, 2003. UBA-H2, Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einf. alternat. Kraftstoffe. Pehnt, Ganzheitliche Bilanzierung, 2002. Schweimer, Sachbilanz des Golf A4, Wolfsburg.



Antriebsstrang-Wirkungsgrade und Potenziale im Vergleich bei Tank-To-Wheel-Betrachtung



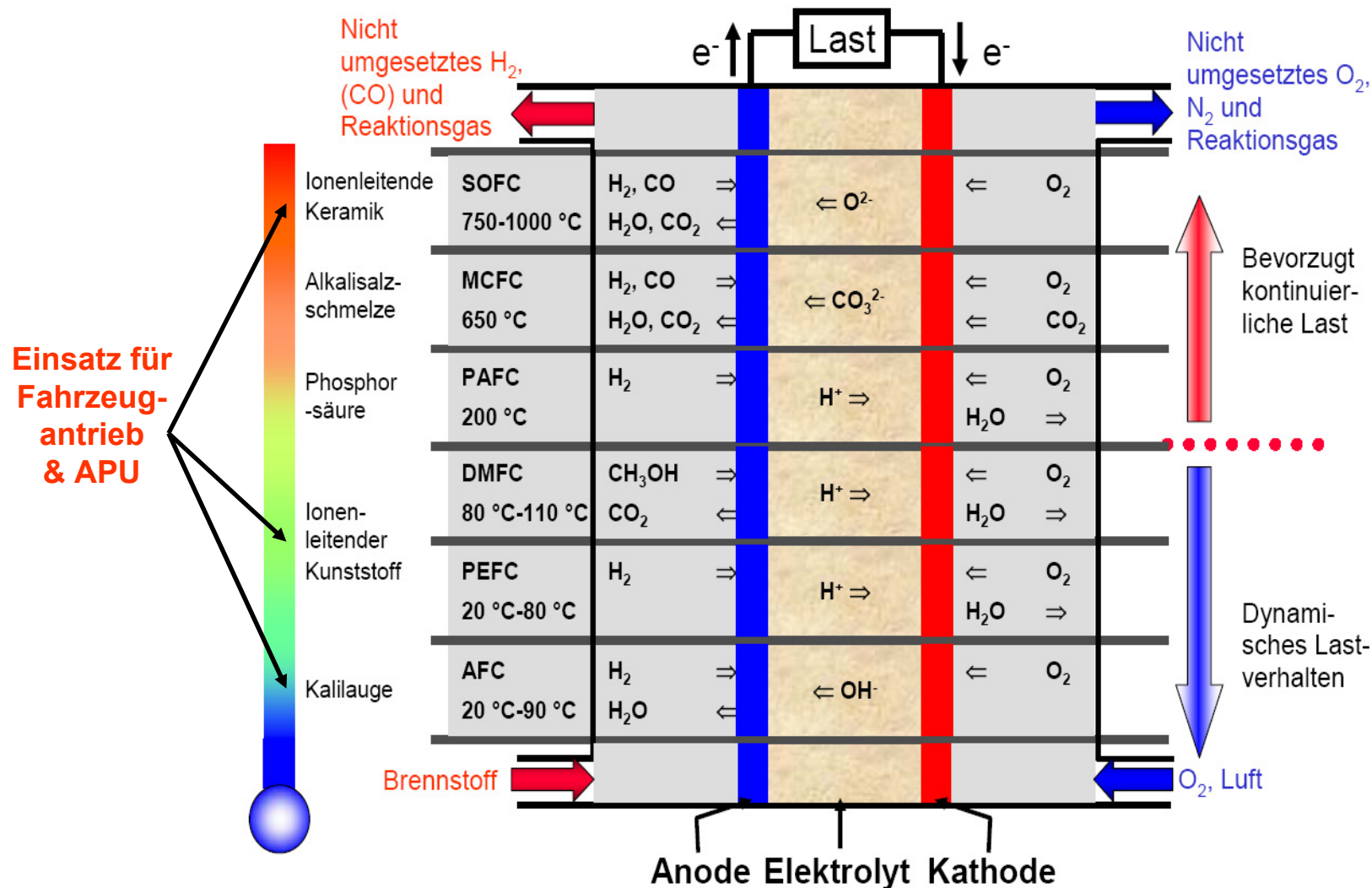
**Hohe Effizienz: Geringer Primärenergieeinsatz
Überkompensation der Energieverluste der Wasserstoffherstellung
durch hohen Brennstoffzellen-Wirkungsgrad**



Vortragsinhalt

- Kurzvorstellung des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte
- Motivation der Entwicklung neuer Antriebsstränge
- **Brennstoffzellen-Technologien und Funktionsprinzipien**
- Architektur von Brennstoffzellen-Antriebssträngen im Fahrzeug
- Verfahrenstechnisches Konzept eines PEFC-Systems
- Verfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen
- PEFC-Systempackage im Fahrzeug
- Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und Antriebsstrang
- Wasserstoffspeicher-Technologien für Fahrzeuge

Klassifizierung der Brennstoffzellen-Technologien



Das Funktionsprinzip der Niedertemperatur-Brennstoffzelle PEFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)



Anode



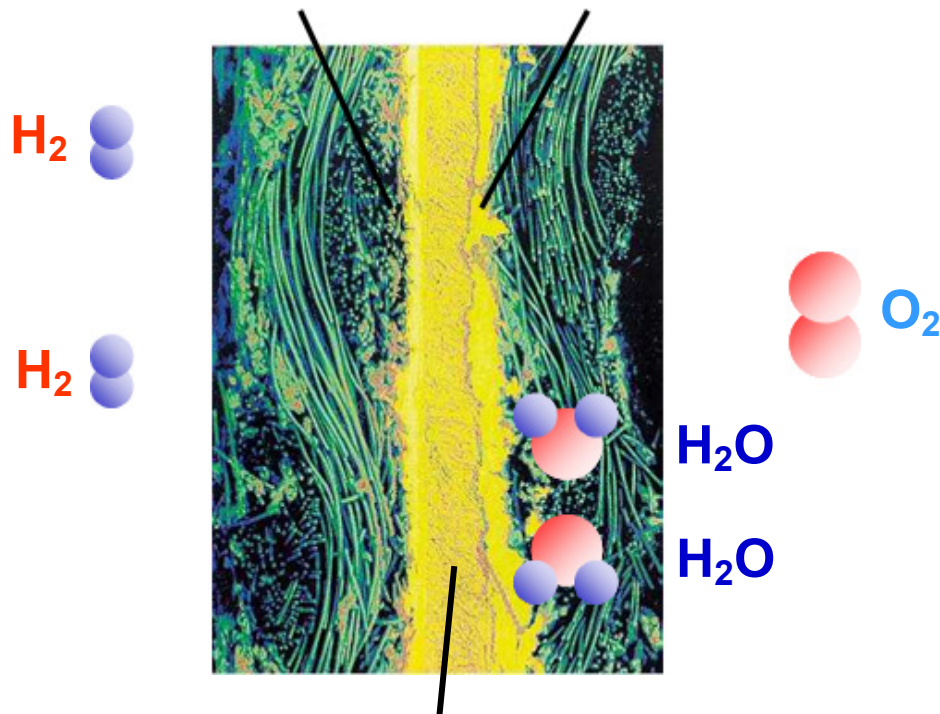
Kathode

- **Anode:** Wasserstoff (H_2) wird oxidiert (gibt Elektronen ab)

- **Elektrolyt-Membran**
Protonenleiter aber elektrischer Isolator

- **Kathode:** Sauerstoff (O_2) wird reduziert (erhält Elektronen)

- **Typische Werte unter Last**
0,7 V Spannung
0,75 A/cm² Strom



Polymerelektrolyt-Membran

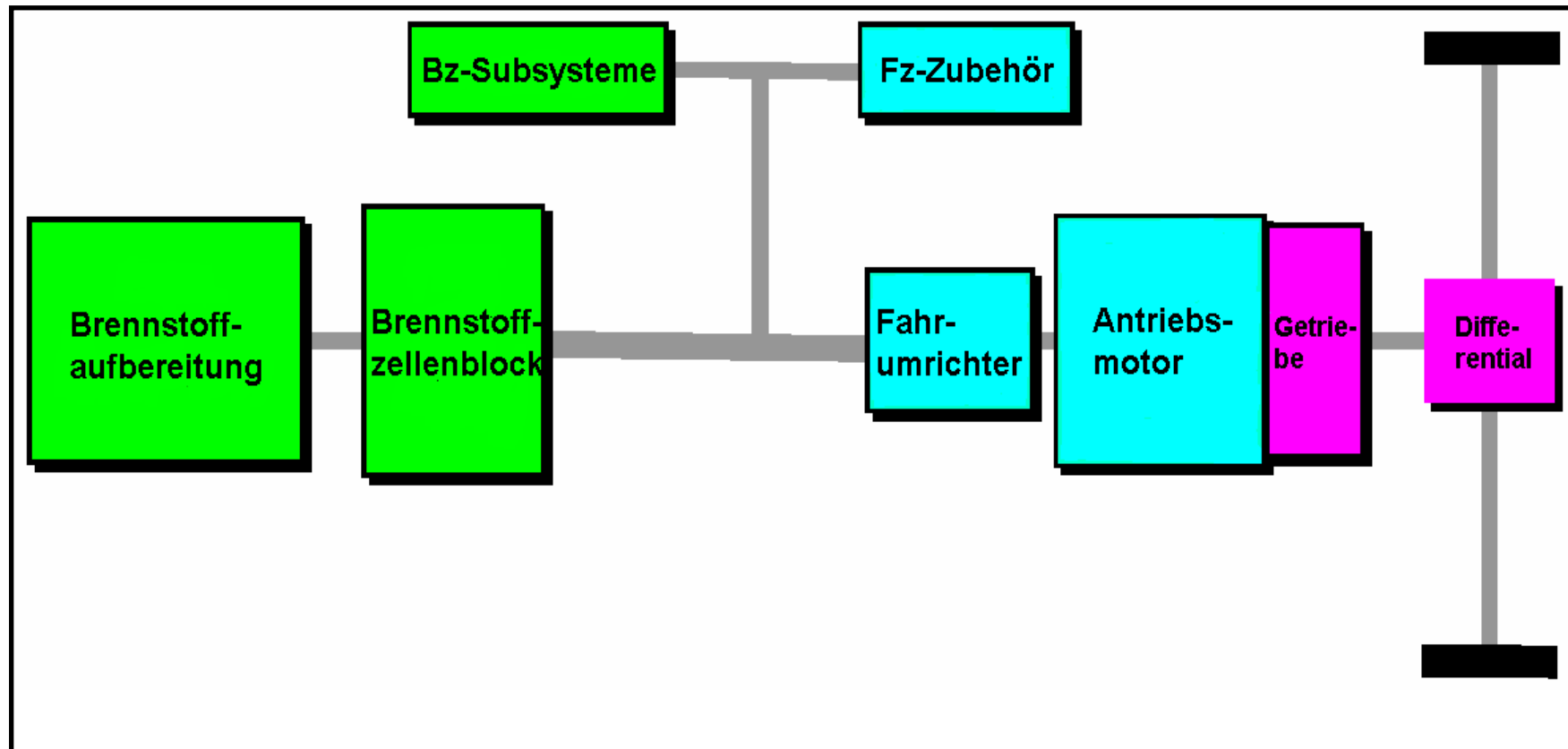


Vortragsinhalt

- Kurzvorstellung des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte
- Motivation der Entwicklung neuer Antriebsstränge
- Brennstoffzellen-Technologien und Funktionsprinzipien
- **Architektur von Brennstoffzellen-Antriebssträngen im Fahrzeug**
- Verfahrenstechnisches Konzept eines PEFC-Systems
- Verfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen
- PEFC-Systempackage im Fahrzeug
- Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und Antriebsstrang
- Wasserstoffspeicher-Technologien für Fahrzeuge

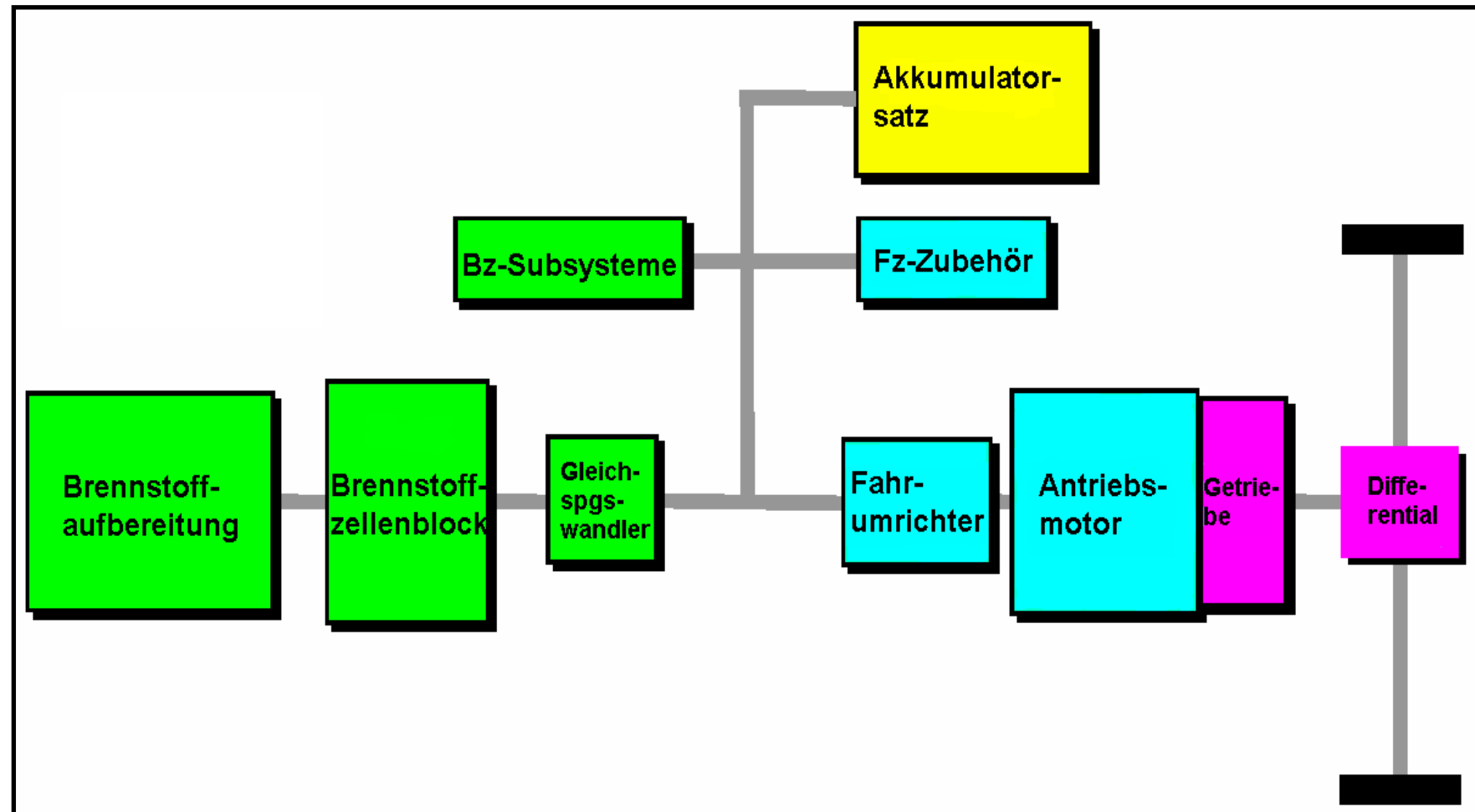


Direkter Brennstoffzellen- Antriebsstrang





Hybrid-Brennstoffzellen-Antriebsstrang



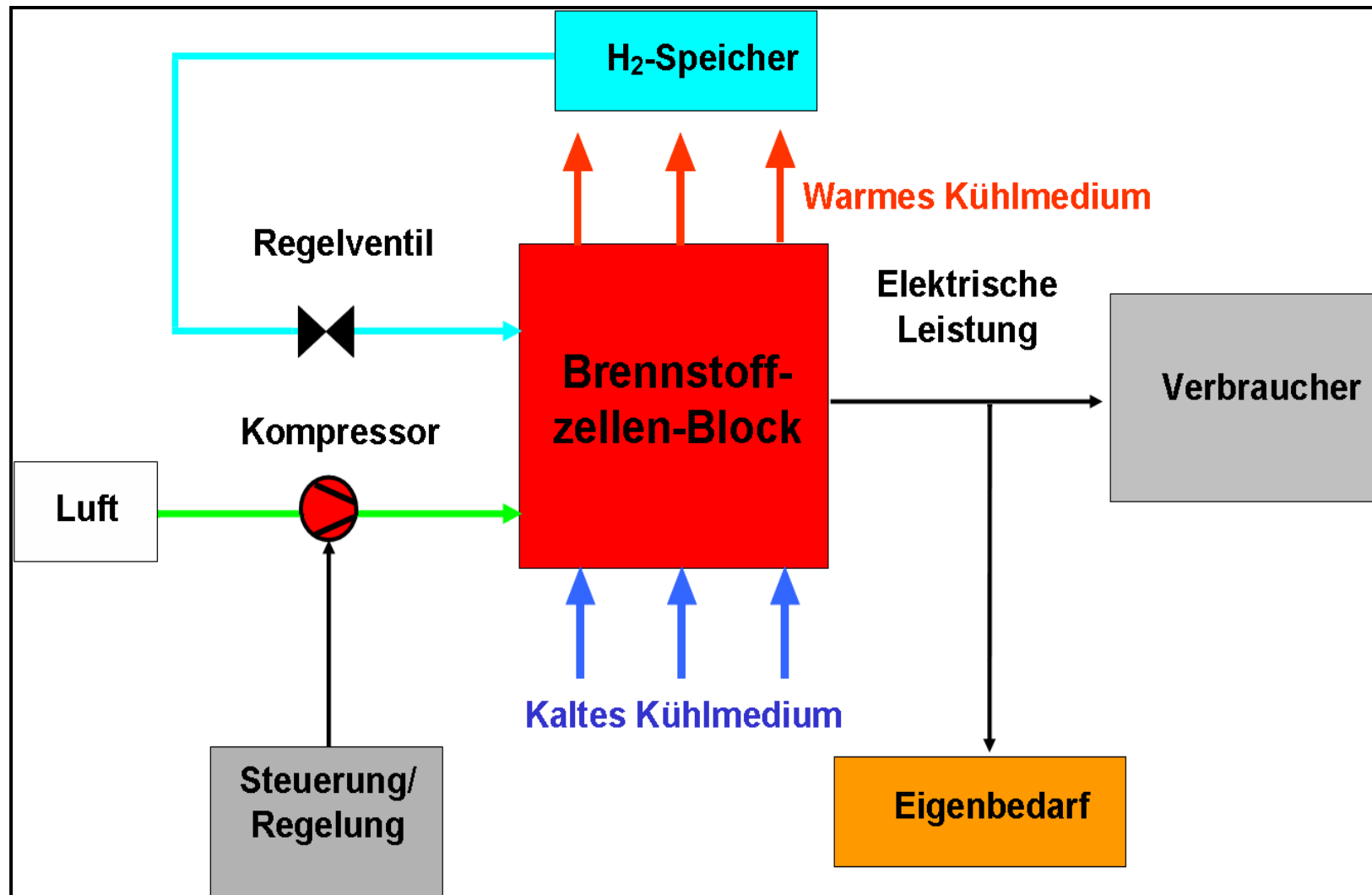


Vortragsinhalt

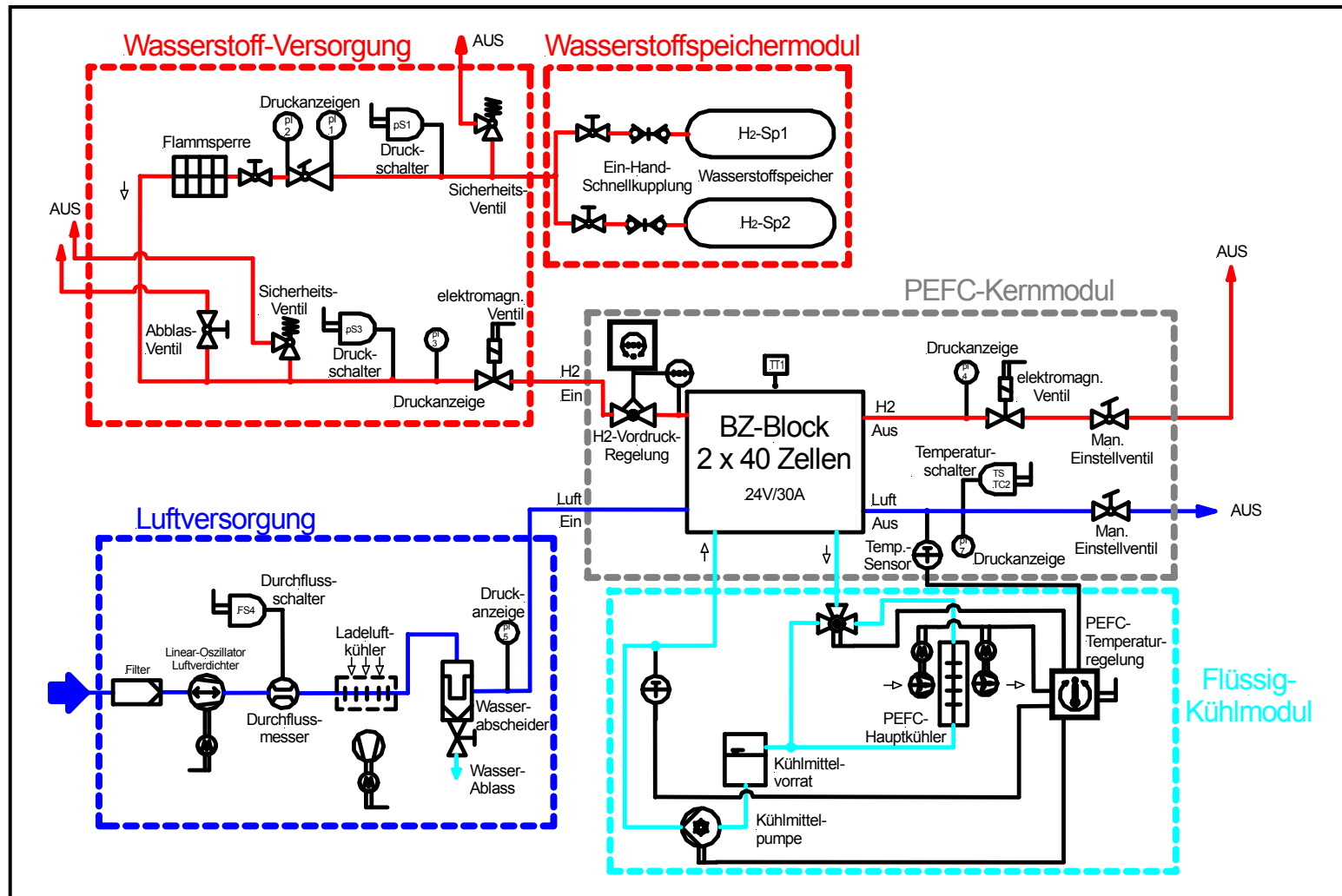
- Kurzvorstellung des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte
- Motivation der Entwicklung neuer Antriebsstränge
- Brennstoffzellen-Technologien und Funktionsprinzipien
- Architektur von Brennstoffzellen-Antriebssträngen im Fahrzeug
- **Funktion und Aufbau eines PEFC-Systems und Antriebsstrangs**
- Verfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen
- Verfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen
- PEFC-Systempackage im Fahrzeug
- Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und Antriebsstrang
- Wasserstoffspeicher-Technologien für Fahrzeuge



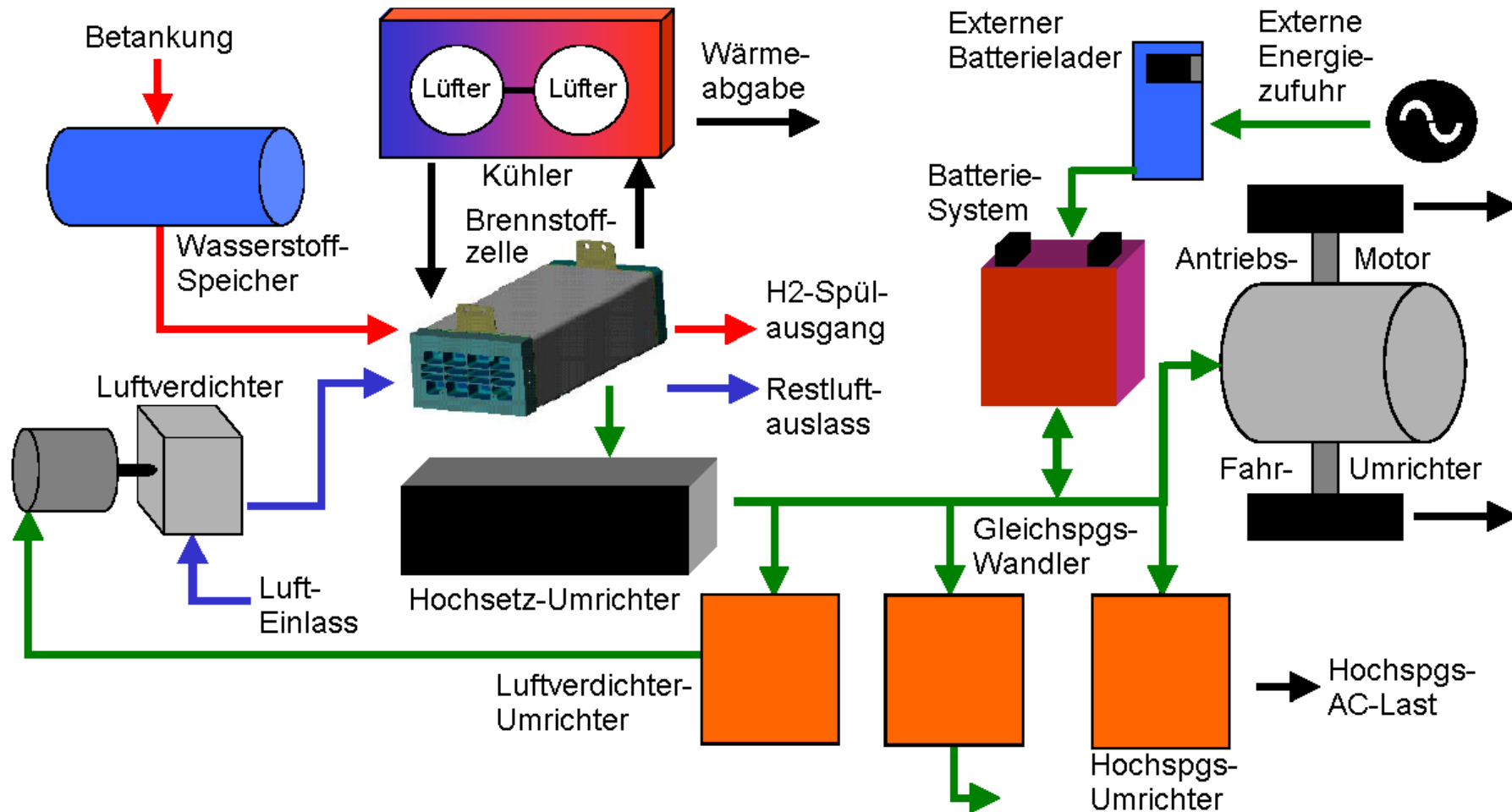
Verfahrenstechnisches Basiskonzept eines PEFC-Systems



Blockschaltbild eines wassergekühlten modularen PEFC-Systems



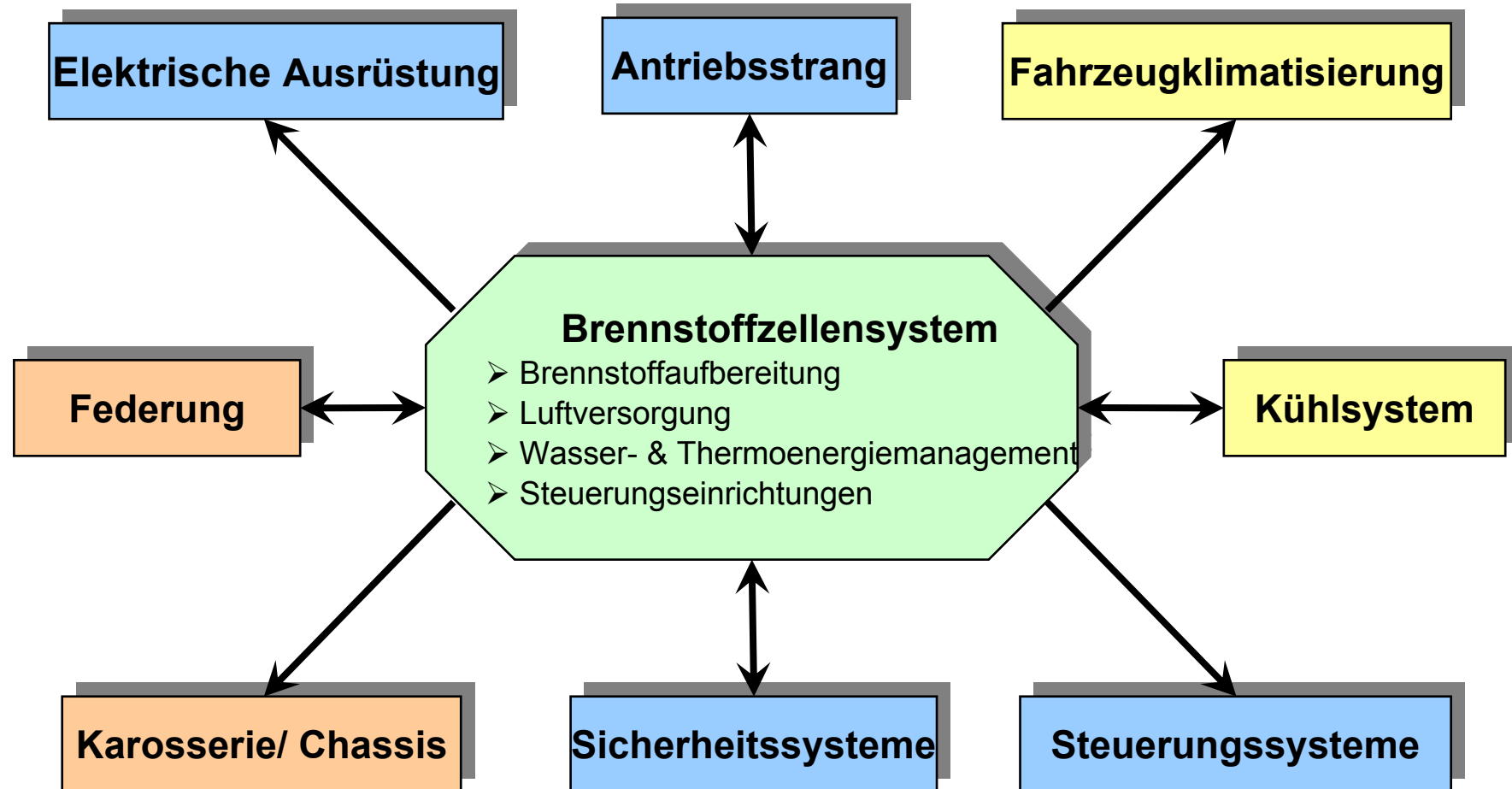
Teilsysteme eines Brennstoffzellen-Antriebsstrangs



Quelle: „System Integration, Modeling and Validation of a Fuel Cell Hybride Electric Vehicle“, Ogburn at Virginia Polytech, 2000



Funktionseinheiten eines Brennstoffzellenfahrzeugs



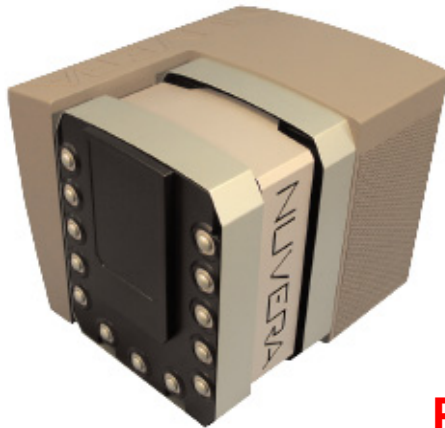


Vortragsinhalt

- Kurzvorstellung des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte
- Motivation der Entwicklung neuer Antriebsstränge
- Brennstoffzellen-Technologien und Funktionsprinzipien
- Architektur von Brennstoffzellen-Antriebssträngen im Fahrzeug
- Funktion und Aufbau eines PEFC-Systems und Antriebsstrangs
- **Verfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen**
- PEFC-Systempackage im Fahrzeug
- Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und Antriebsstrang
- Wasserstoffspeicher-Technologien für Fahrzeuge

Beispiele verfügbarer Brennstoffzellenmodule verschiedener Hersteller (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Nuvera – Powerflow, 5kW



Nedstack – PS6-100, 6-100kW



Proton Motors – MH30, 18-38kW



Nuvera – Andromeda, 50kW



Hydrogenics – HyPM HD65, 65kW



Ballard – Mark902, 85kW





Vortragsinhalt

- Kurzvorstellung des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte
- Motivation der Entwicklung neuer Antriebsstränge
- Brennstoffzellen-Technologien und Funktionsprinzipien
- Architektur von Brennstoffzellen-Antriebssträngen im Fahrzeug
- Verfahrenstechnisches Konzept eines PEFC-Systems
- Verfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen
- **PEFC-Systempackage im Fahrzeug**
- Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und Antriebsstrang
- Wasserstoffspeicher-Technologien für Fahrzeuge

Modulares PEFC-Systemkonzept mit weitgehenden Packagefreiheiten für die Fahrzeugintegration

Kühlmodul

H₂-Versorgungsmodul

Luft-Versorgungsmodul

PEFC-Systemmodul

Steuerungsmodul



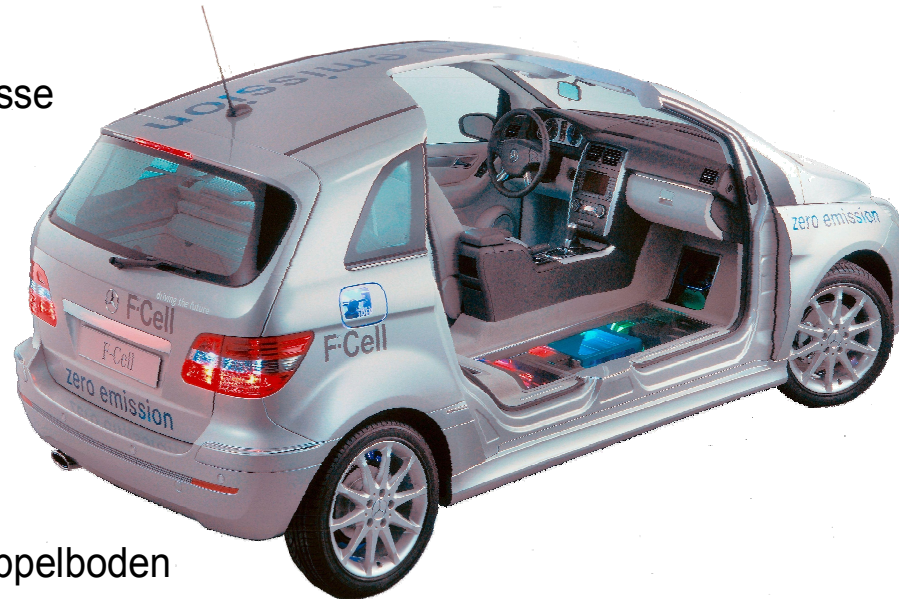
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

PEFC-Systempackage im Fahrzeug

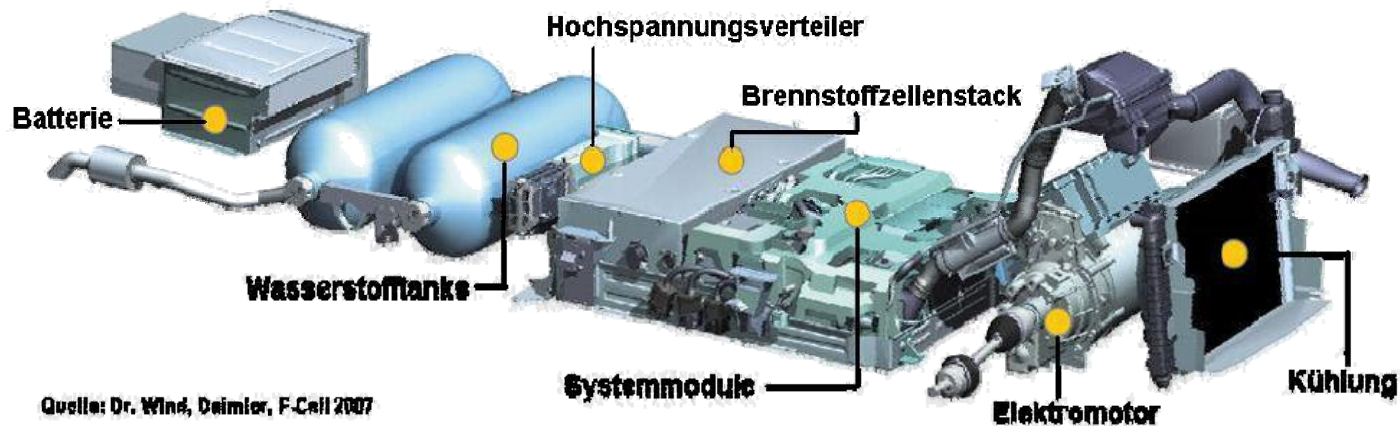
Institut für Fahrzeugkonzepte

Unterboden-Packagekonzept des PEFC-Antriebsstrangs im Mercedes B-Klasse F-cell

F-Cell Daimler B-Klasse



Integrationsbeispiel
PEFC-System im Doppelboden



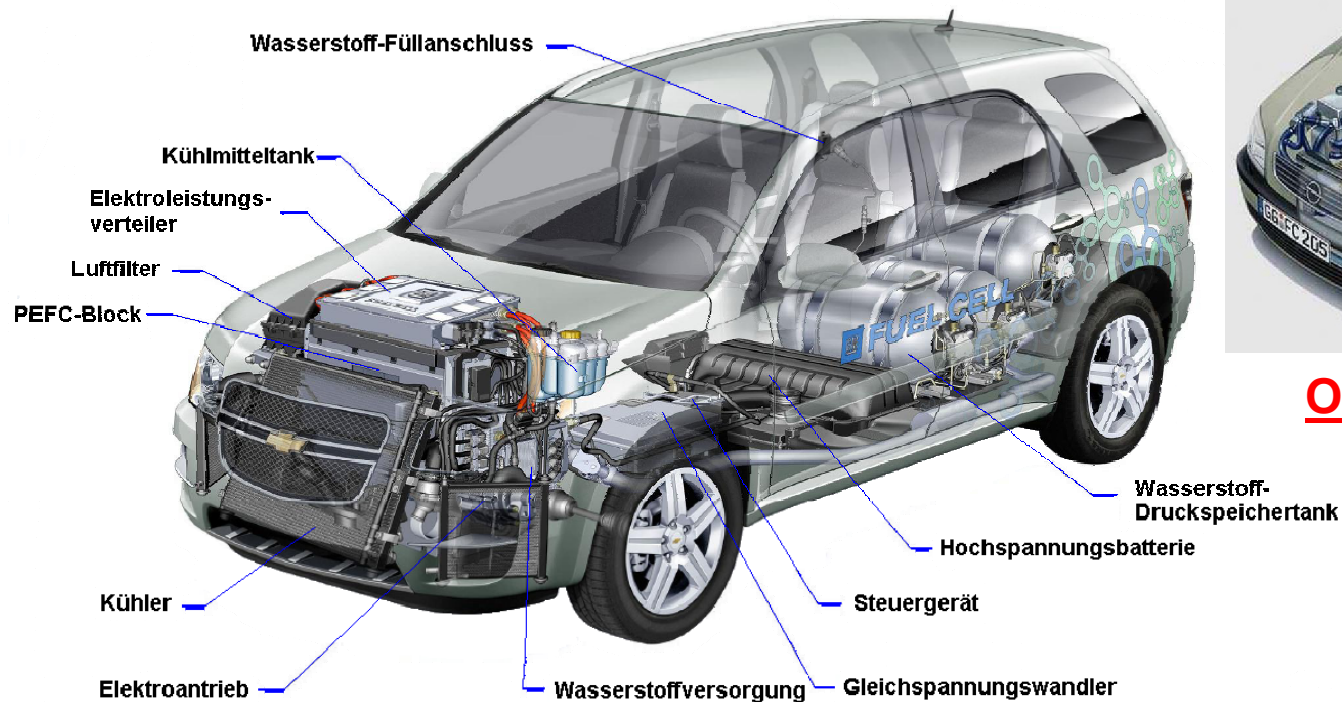
Quelle: Dr. Wind, Daimler, F-Cell 2007
Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

PEFC-Systempackage im Fahrzeug

Institut für Fahrzeugkonzepte

Motorraum-Packagekonzept des PEFC-Antriebsstrangs in GM- und Opel-Brennstoffzellenfahrzeugen

Chevrolet Equinox Fuel Cell

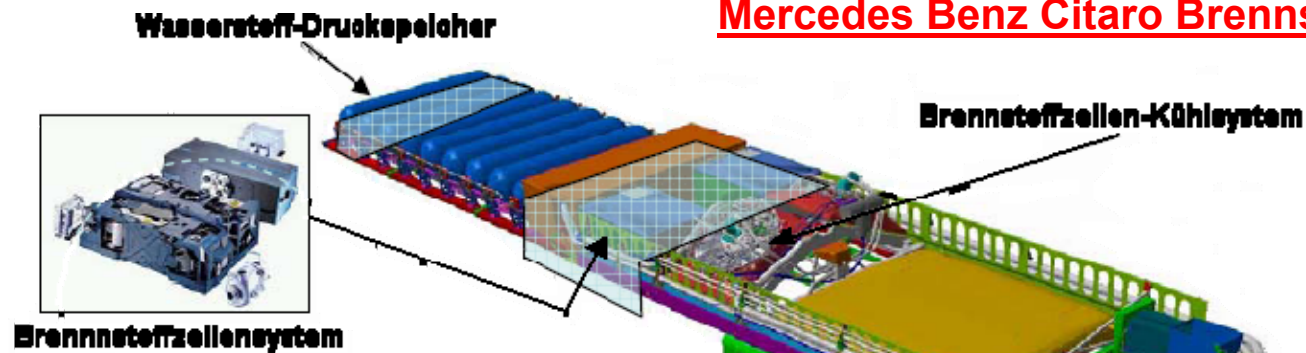


Opel / GM HydroGen 1

Quelle: Dr. Eberle GM / Opel Fuel Cell Activities, F-cell 2007

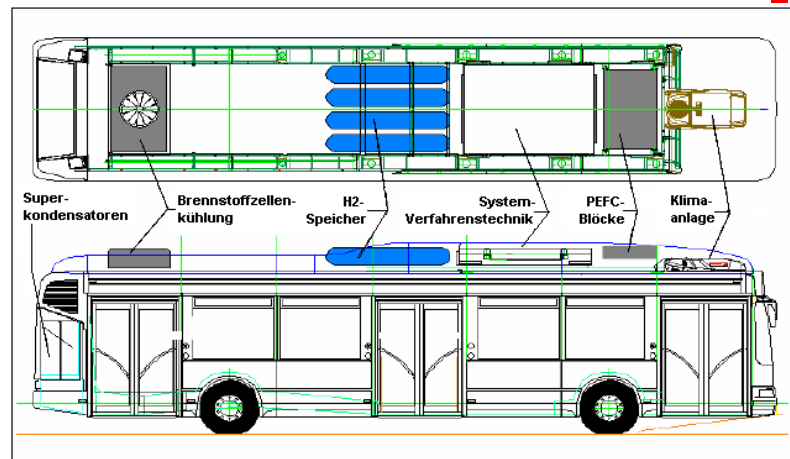
Quelle: „Technische Daten des „HydroGen 1“, GM Adam Opel AG, 2002

Packagekonzept des PEFC-Antriebsstrangs in Brennstoffzellenbussen

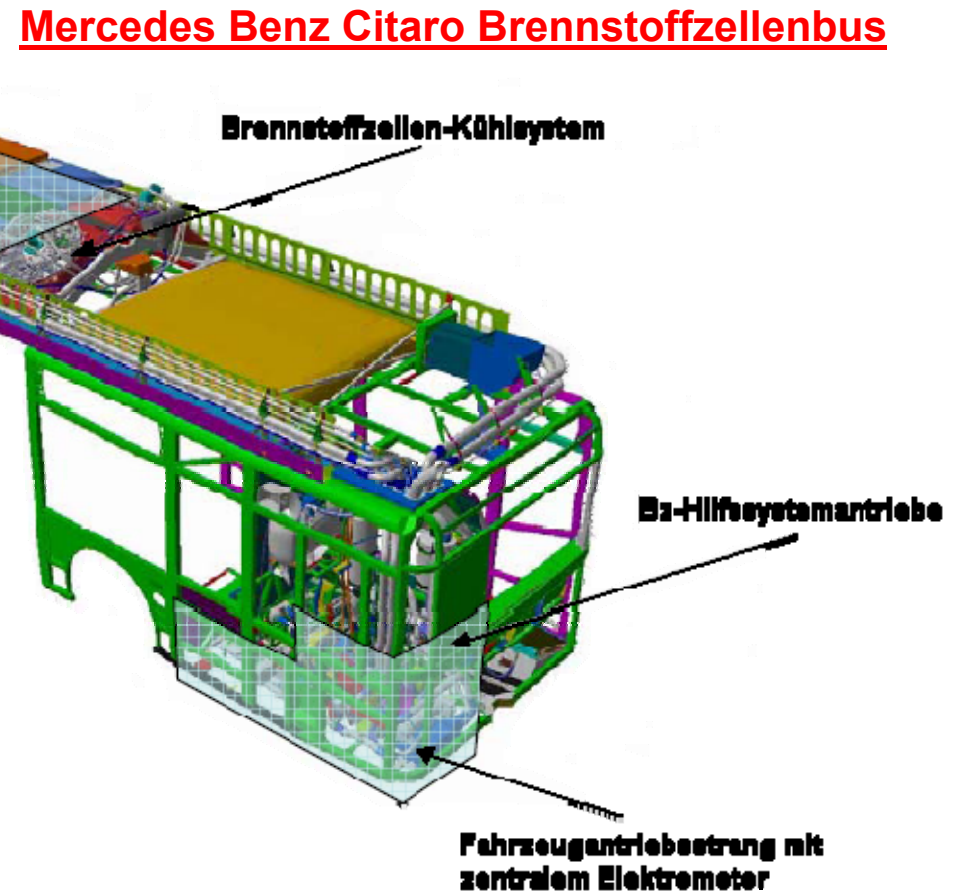


Mercedes Benz Citaro Brennstoffzellenbus

Proton Motors FC City Bus Projekt FCZ H₂bus



Quelle: „PEM Fuel Cells in Hybrid Configuration“, B. Eska, F-cell 2007



Quelle: „Brennstoffzellen im mobilen Einsatz“, F. Panik, F-cell 2007

Brennstoffzellen-Lokomotiven für den Wasserstoffbetrieb

Konzepte und Prototypen



20kW
PEFC-Leistung

Fuelcell Locomotive Pulling 3 Fully Loaded 4 Ton Ore Cars

Quelle: Final Technical Report, Cooperative Agreement:
DE-FC36-99GO10458, 1/28/2003

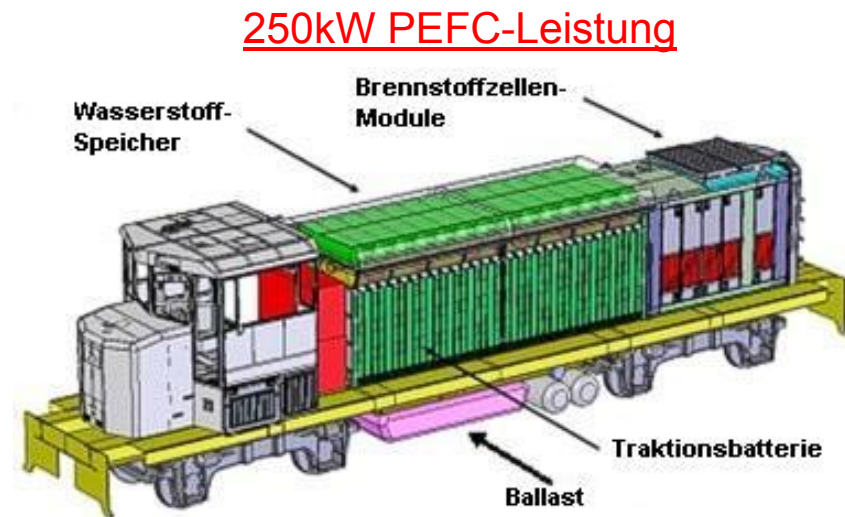


1200kW PEFC-Leistung

Quelle: A.R. Miller et al. / Journal of Power Sources 157 (2006) 855–861



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



250kW PEFC-Leistung

Quelle: A.R. Miller et al. / Journal of Power Sources 173 (2007) 935–942

Lokomotive bei Umbaubeginn



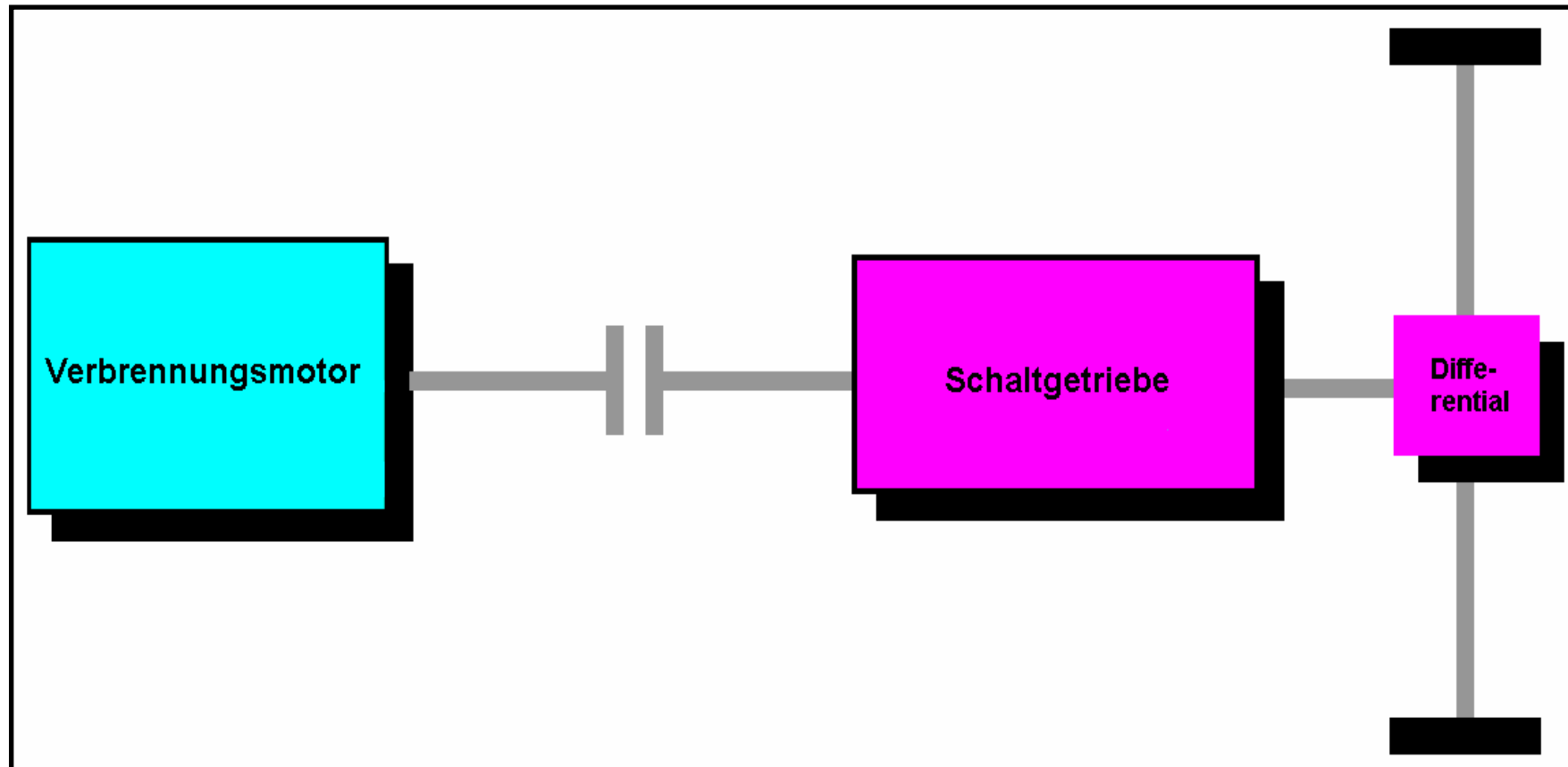


Vortragsinhalt

- Kurzvorstellung des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte
- Motivation der Entwicklung neuer Antriebsstränge
- Brennstoffzellen-Technologien und Funktionsprinzipien
- Architektur von Brennstoffzellen-Antriebssträngen im Fahrzeug
- Verfahrenstechnisches Konzept eines PEFC-Systems
- Verfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen
- PEFC-Systempackage im Fahrzeug
- **Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und Antriebsstrang**
- Wasserstoffspeicher-Technologien für Fahrzeuge



Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor



BMW Hydrogen 7 mit bivalentem H₂-Verbrennungsmotor



Quelle: Autopresse.de, Dez. 2006

Motordaten:

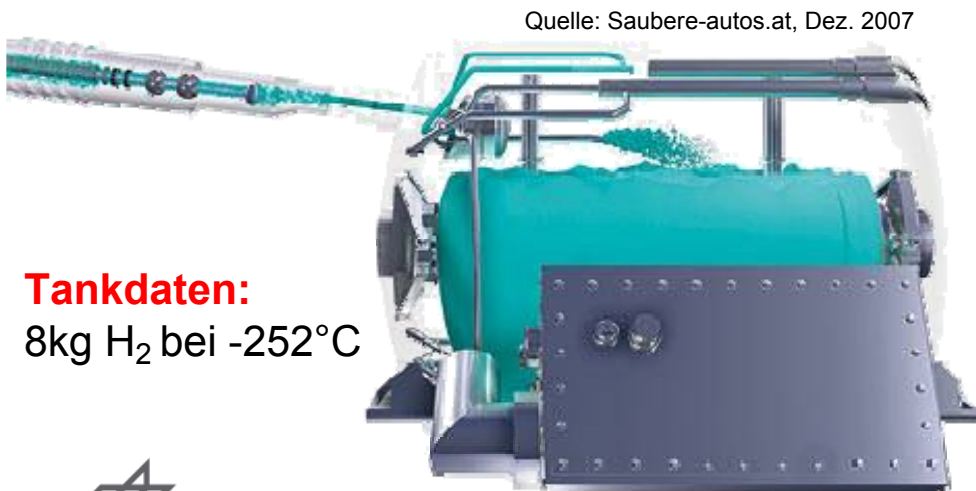
6l Hubraum

191kW

390Nm / 4300 1/min



Quelle: Claus Ableiter, 2008



Tankdaten:

8kg H₂ bei -252°C

H₂-Flüssigtanksystem
hinter der Rücksitzbank

MAN Busse mit H₂-Verbrennungsmotoren



MAN-Bus
Typ Lion's City H

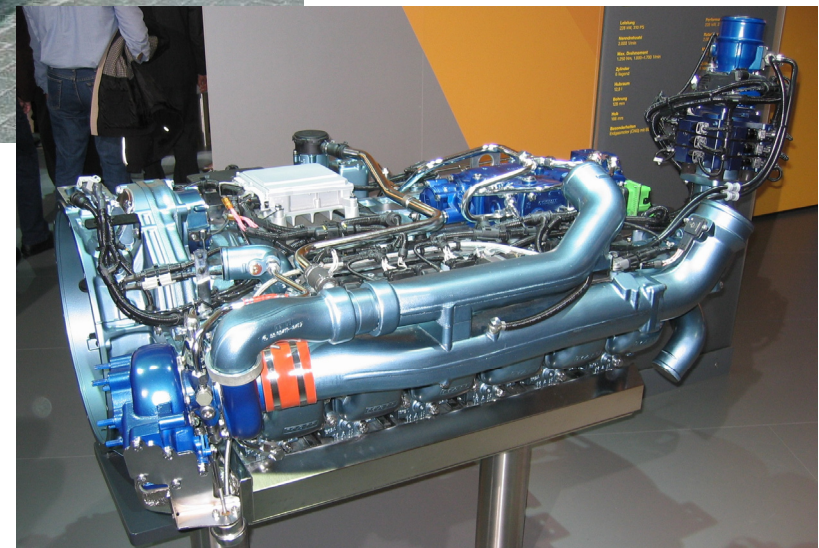
Quelle: TOTAL, Werner Weisflog, 2008

Wasserstoff-Verbrennungsmotor **MAN Typ H 2876 UH**

Motordaten:

H 2876 UH	H2876 LUH01
12,8l	12,8 l
150kW / 2200 1/min	200kW / 2200 1/min
760Nm / 1000 1/min	1000Nm / 1000 1/min

Quelle: The Knack, 2008



Andere Fahrzeug-Beispiele mit H₂-Verbrennungsmotor



Ford Focus C-MAX H2-ICE
2,3l, 82kW für H₂-Betrieb



Quelle: motortalk.de, Jul. 2004

**Linde Gabelstapler
Baureihe 39x**
mit

**VW Industriemotor
2l, 43kW für H₂-Betrieb**



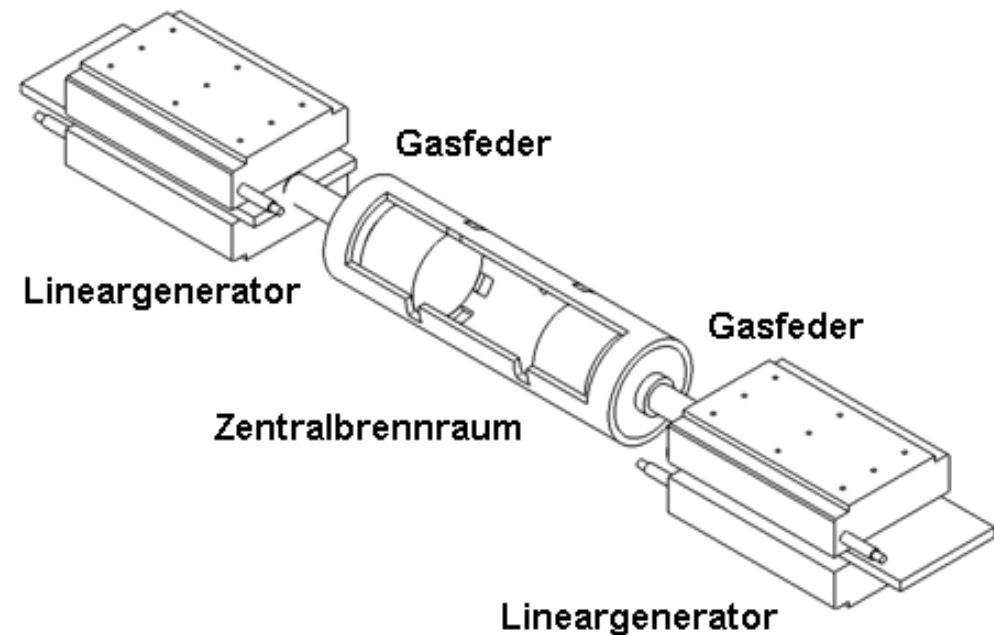
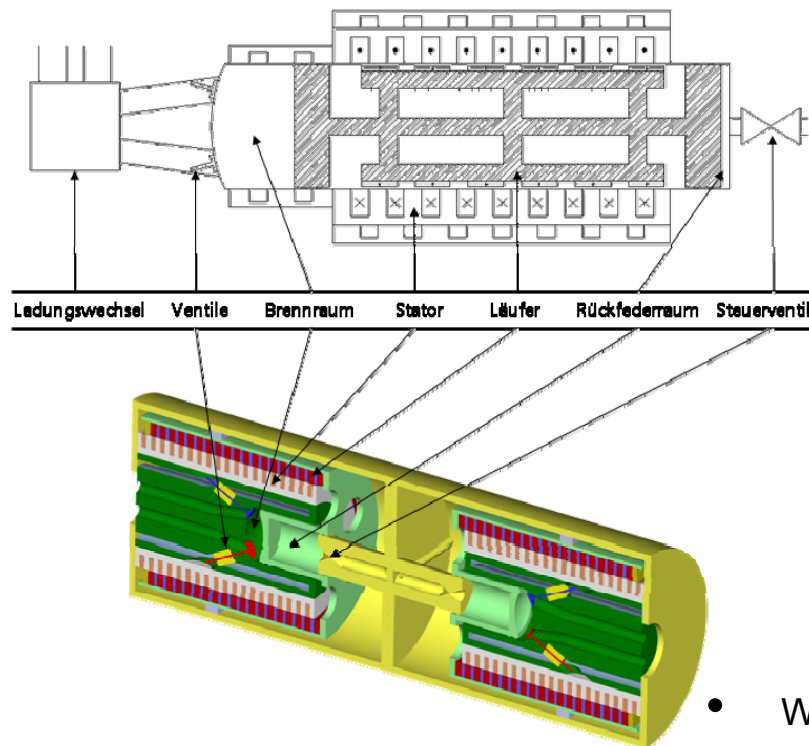
Quelle: linde-mh.de.de, Mär. 2010

Mazda RX-8 Hydrogen RE



Quelle: hybrid-autos.info, 2006

Der Freikolben-Lineargenerator FKLG als neues H₂-Verbrennungsmotorkonzept in der Entwicklung



- Weltweit erster Verbrennungsmotor mit variabler Verdichtung und variablem Hubraum
- Flexfuel-Eigenschaften für optimale Verbrennung aller Kraftstoffe wie Benzin, Diesel, Erdgas, Biokraftstoff, **Wasserstoff**
- Sehr niedrige Bauhöhe von 15 cm realisierbar
- 95 g CO₂/km in 2020 erreichbar



Vortragsinhalt


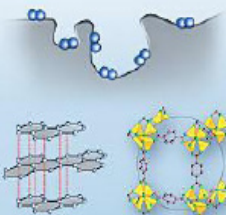
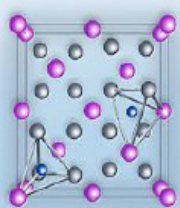

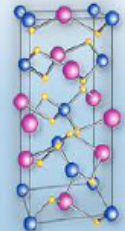
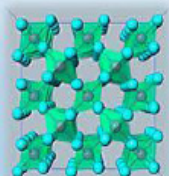

- Kurzvorstellung des DLR-Instituts für Fahrzeugkonzepte
- Motivation der Entwicklung neuer Antriebsstränge
- Brennstoffzellen-Technologien und Funktionsprinzipien
- Architektur von Brennstoffzellen-Antriebssträngen im Fahrzeug
- Verfahrenstechnisches Konzept eines PEFC-Systems
- Verfügbarkeit von Brennstoffzellensystemen
- PEFC-Systempackage im Fahrzeug
- Wasserstoff-Verbrennungsmotoren und Antriebsstrang
- **Wasserstoffspeicher-Technologien für Fahrzeuge**



Die Grenzen des Wasserstoffs als Kraftstoff / Brennstoff

- Wasserstoff ist keine Energiequelle, sondern ein **Energieträger**. Er muss immer erst unter Aufwand von Primärenergie erzeugt werden.
- Wasserstoff ist ein **sauberer** Energieträger, aber in der ökologischen Gesamtbilanz kann er nicht besser dastehen als die Primärenergie, mit deren Hilfe er erzeugt wird.
- **Billiger** als diese Primärenergien kann er daher auch nicht sein.
- Wasserstoff und Brennstoffzellen stehen stets in Konkurrenz zu anderen umweltfreundlichen und nachhaltigen Technologien; sie sind kein Wunder- oder Universalheilmittel.

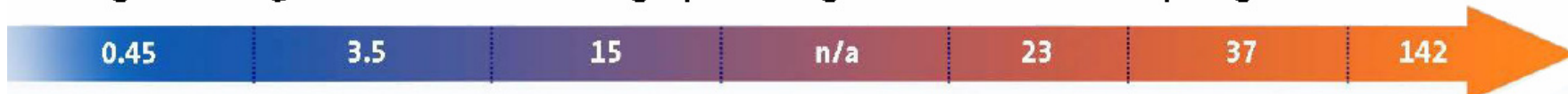
Wasserstoffspeichertechnologien & ihre Betriebsrandbedingungen

						
Flüssig-Wasserstoff	Kryogen-Adsorption	Metallhydrid-speicher	Druck-wasserstoff	Alanate	Salzähnliche Metallhydride	Wasser
LH_2	Activated carbon	Laves Phase Comp. / FeTiH_x / LaNi_5H_x	CGH_2	NaAlH_4	MgH_2	H_2O
100 mat.wt.%	6.5 mat.wt.%	2 mat.wt.%	100 mat.wt.%	5.5 mat.wt.%	7.5 mat.wt.%	11 mat.wt.%

Betriebstemperatur des Speichers



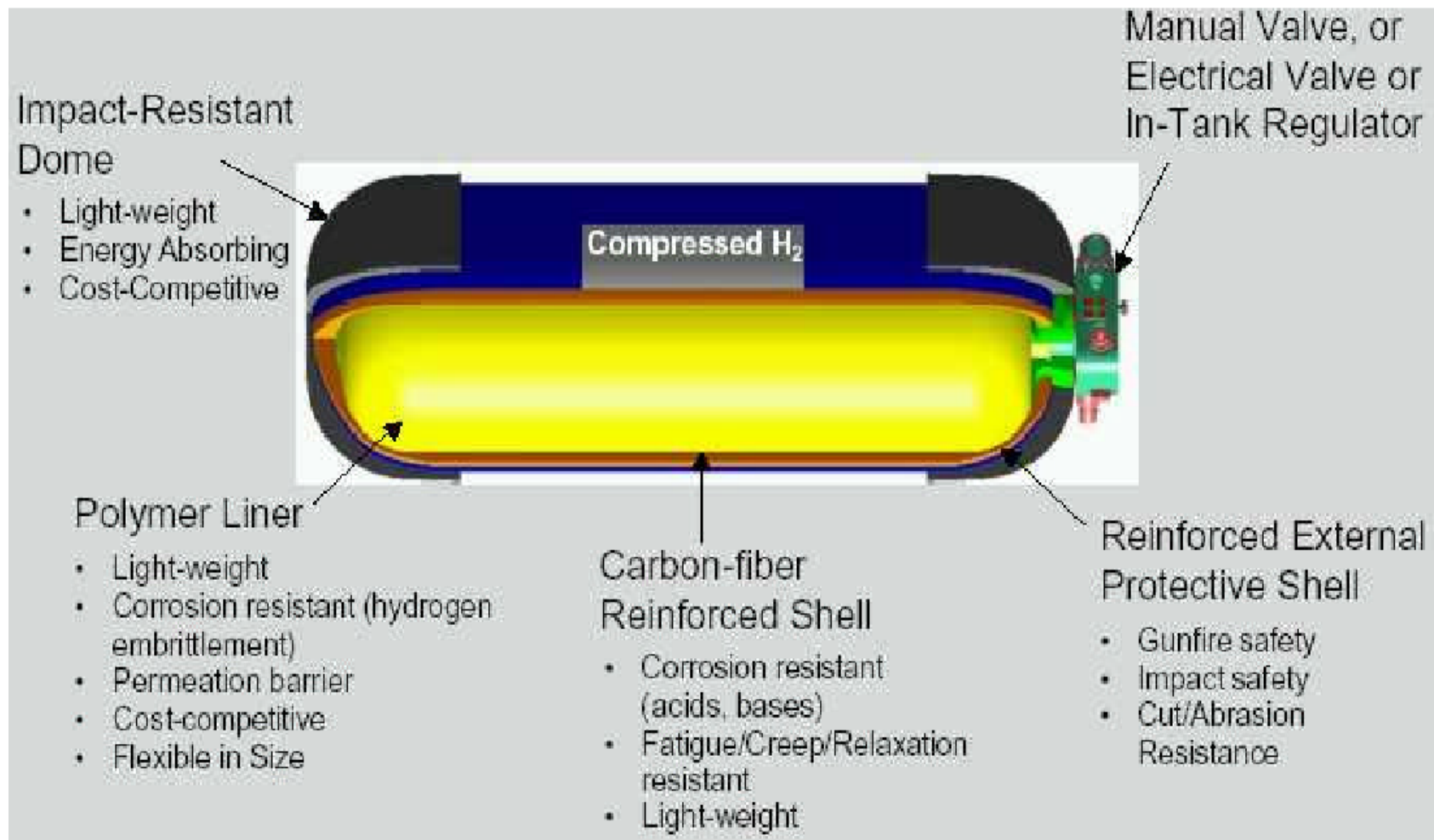
Vergleichsenergieaufwand zur Freisetzung/ Speicherung von Wasserstoff in MJ pro kg H₂



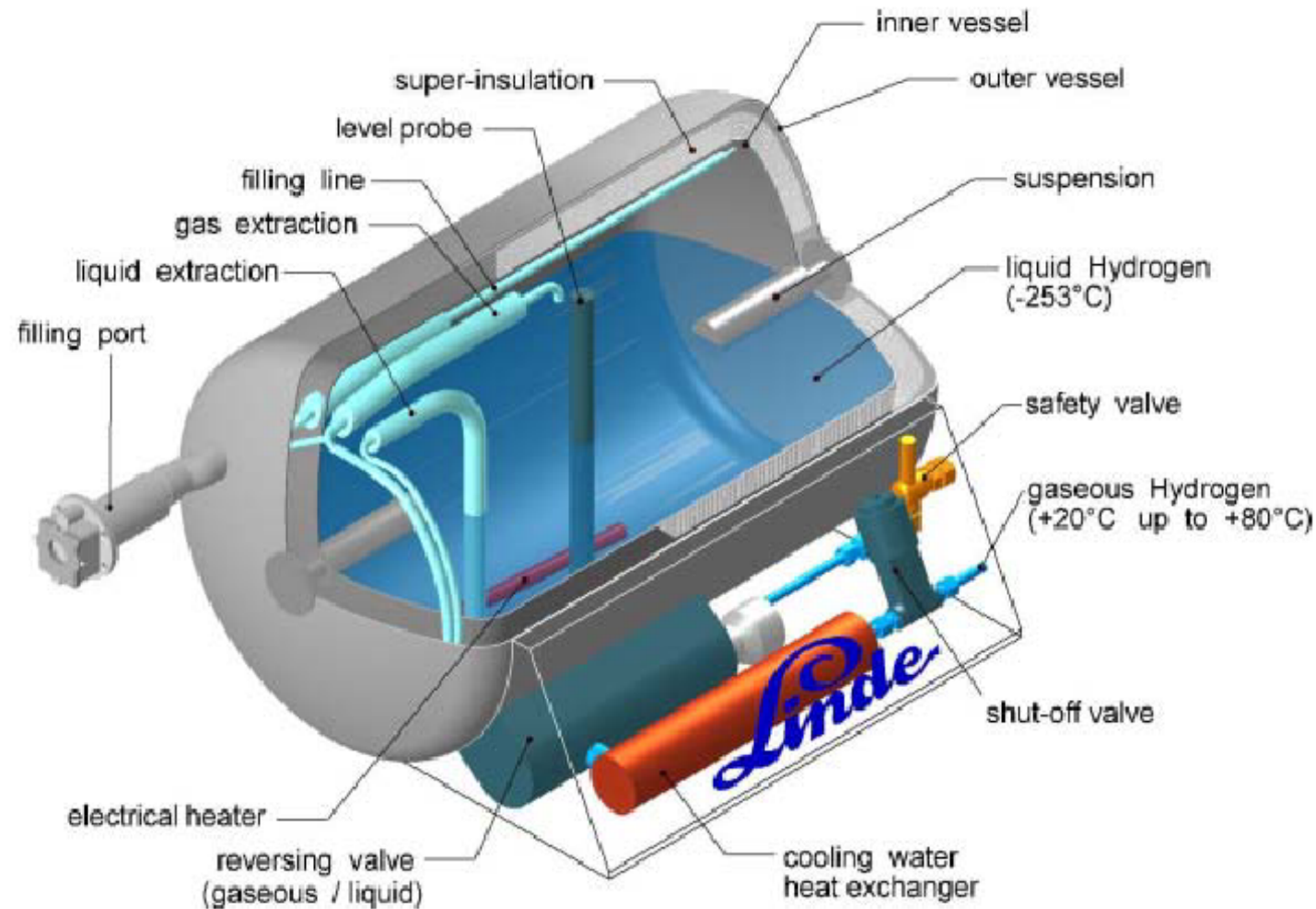
B. Bogdanovic, U. Eberle, M. Felderhoff, and F. Schüth / Scripta Materialia 56 (2007) 813-816
 R. von Helmolt, U. Eberle / Journal of Power Sources 165 (2007) 833-843

Quelle: Dr. Eberle GM / Opel Fuel Cell Activities, F-cell 2007

Tanksystem für komprimierten gasförmigen Wasserstoff: 350 bar Leichtgewichtsspeicher



Tanksystem für tiefkalten flüssigen Wasserstoff

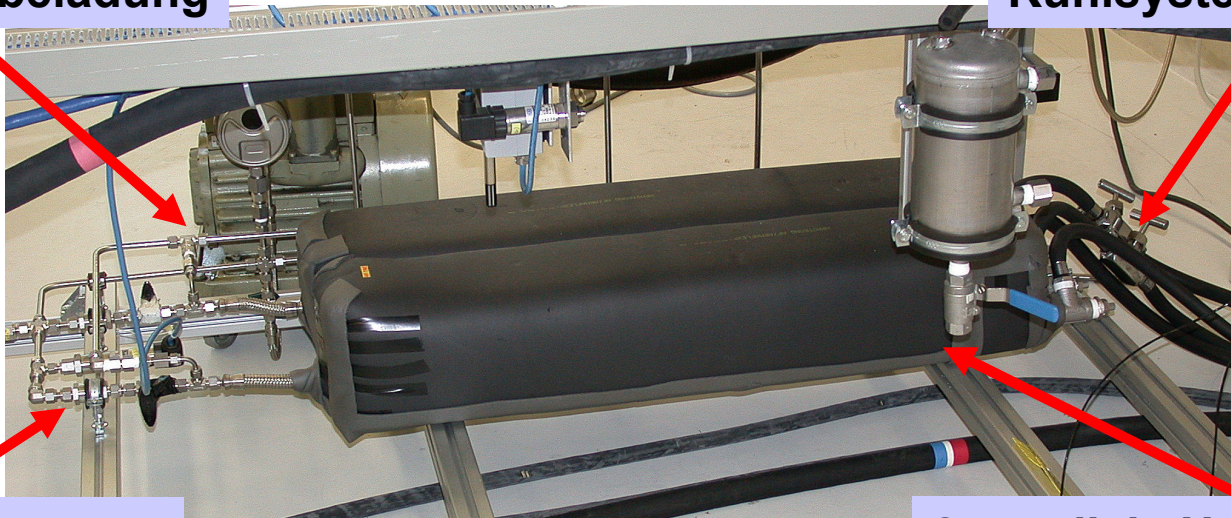


Quelle: „Carbon to Hydrogen Roadmaps for Passenger Cars“, Ricardo, 2002

Tanksystem für gasförmigen Wasserstoff: Metallhydridspeicher (Sorptionsspeicher)

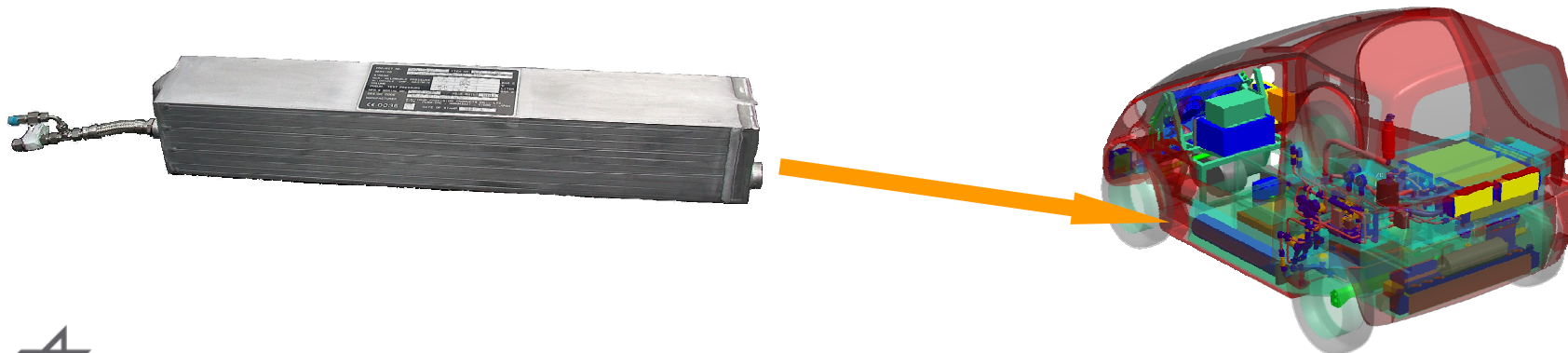
Wasserstoffbeladung

Kühlsystemanbindung



Wasserstoffabgabe

2 parallele Hydridspeicher



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wasserstoffspeicher-Technologien für Fahrzeuge

Institut für Fahrzeugkonzepte



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

**Für Ihre Fragen zu diesem Vortrag
stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung.**

Deutsches Zentrum für Luft- & Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Fahrzeugkonzepte (DLR-FK)
Dipl.-Ing. Andreas Brinner
Pfaffenwaldring 38-40, D-70569 Stuttgart
Tel: 0711 6862 574 / Fax: 0711 6862 1574
E-mail: andreas.brinner@dlr.de / Internet: www.dlr.de/fk